

УДК 621.383

Предельные значения чувствительности тепловизоров и информативности систем технического зрения

И. И. Таубкин, М. А. Трищенко

Государственное унитарное предприятие «НПО «ОРИОН», Москва, Россия

Представлены основные результаты теоретических исследований предельных (ограниченных флуктуациями фона) температурной чувствительности тепловизоров и информационной емкости систем технического зрения.

Рассчитаны спектральные зависимости эквивалентной шуму разности температур для тепловизоров с квантовыми и тепловыми приемниками излучения. Показано, что по этому параметру тепловизоры, использующие лучшие матричные фотоприемные устройства, приближаются к теоретическому пределу.

Обнаружено, что по информационному (динамическому) потенциалу и предельной информационной емкости тепловидение в условиях теплового баланса Земли не уступает дневному человеческому зрению.

Предельные значения удельной информационной емкости систем технического зрения при высоких уровнях облучения ограничиваются дифракцией (правило «слово на канал»). При низких уровнях облучения максимальная информационная емкость достигается, когда на элемент пространственного разрешения за время кадра попадает число квантов, необходимое для преобразования одного бита информации (правило «бинарных каналов»). Предельная информационная емкость цветных систем технического зрения пропорциональна числу независимых спектральных каналов.

1. Введение

В последнее десятилетие тепловидение сформировалось как самостоятельная отрасль видеотехники. Тепловизоры используются не только для обнаружения военных целей или комплектации систем наведения высокоточного оружия, но и для теплового мониторинга зданий, энергетических систем и машин, для вождения и профилактики транспортных средств, в медицинской диагностике, экологии, системах охраны и предупреждения о пожарах и во многих других областях. Значительный прогресс в создании фокальных матриц, включая неохлаждаемые, систем обработки сигналов изображения и микрокриогеники позволил приступить к созданию «смотрящих» тепловизоров, обладающих высокой чувствительностью и доступных массовому пользователю.

В связи с этим особую актуальность приобретают кардинальные для развития тепловидения и других систем технического зрения вопросы:

1. Каков теоретический предел температурной чувствительности в тепловидении?

2. Как зависит предельная температурная чувствительность тепловизора от его спектрального диапазона?

3. Каковы возможности квантовых и тепловых приемников излучения при регистрации теплового изображения?

4. Чем, кроме принципиально неустранимых фоновых флуктуаций, ограничивается чувствительность реальных тепловизоров?

5. Каков теоретический предел для информационной емкости тепловидения?

6. Как соотносятся между собой по информационной емкости человеческое зрение и такие, например, системы технического зрения, как тепловидение и ночное видение?

Последние проблемы представляются особенно актуальными в связи с тем, что согласно прогнозам ученых человечество в XXI веке вступает в информационную эру цивилизации.

Авторами был выполнен и опубликован в отечественных и международных журналах цикл работ [1—9], посвященных перечисленным выше физическим проблемам. Ниже изложены основные результаты этих работ, в которых содержатся ответы на фундаментальные вопросы теплового, ночного и дневного видения.

2. Теоретический предел температурной чувствительности тепловизоров с квантовыми фотоприемниками

Авторами показано, что параметры оптико-электронных преобразователей изображения, ограниченные шумами потока фотонов или иными характеристиками излучения от объекта наблюдения (такие как динамический диапазон информационного канала, эквивалентная шуму разность температур в тепловизоре и др.), выражаются в канонической форме в виде произведения двух сомножителей. Первый из них определяется обобщенным коэффициентом собирания

$$\eta = At_s \text{Sin}^2(\beta/2) \quad (1)$$

и описывает систему технического зрения как многомерный накопитель энергии излучения. Накопление происходит по чувствительной площадке фотоприемника A , по времени накопления t_s и по различным направлениям падения излучения в пределах пространственного угла зрения фотоприемника: β в уравнении (1) — угол проекции объектива.

Второй сомножитель представляет собой введенный авторами соответствующий потенциал оптического изображения, являющийся объективной характеристикой поля излучений от объекта наблюдения и нормированный к единичной площади объекта, единичному времени наблюдения и полусферическому углу зрения 2π .

В результате, например, основной параметр тепловизора как обнаружителя — эквивалентная фоновому шуму разность температур $NETD$ — выражается

$$NETD = \eta^{-1/2} NETD_r^* \quad (2)$$

где $NETD_r^*$ — один из потенциалов оптического изображения, а именно удельное значение минимальной разности температур, которая в принципе может быть измерена с помощью излучения от данных объектов.

Соотношения, включающие потенциалы оптического изображения объекта, пригодны для оценки качества широкого класса оптико-электронных изделий, как сканирующих так и «смотрящих», в том числе приборов ночного видения с электронно-оптическими преобразователями, тепловизоров, радиометров и др. Указанные соотношения могут быть использованы и для оценки активных оптико-электронных систем.

Авторами найден фундаментальный предел $NETD_{\min}^*$ для тепловизоров с квантовыми фотоприемниками при его ограничении принципиально неустранимыми фотонными шумами. Оказалось, что минимальное значение $NETD_{\min}^*$

$$NETD_{\min}^* = \frac{1}{1,78} \sqrt{\frac{k}{\sigma T}} = 5,07 \times 10^{-8} \sqrt{\frac{293}{T, K}}. \quad (3)$$

Здесь k и σ — постоянные Больцмана и Стефана-Больцмана соответственно. Полученный результат представляется парадоксальным, так как обычно обнаружительные характеристики инфракрасных приемников ухудшаются с ростом температуры фона, и сформулирован авторами как **тепловизионный парадокс**: *предельное значение эквивалентной фоновому шуму разности температур уменьшается с возрастанием температуры объекта обратно-пропорционально квадратному корню из этой температуры*. Соотношение (3) является следствием степенной зависимости от температуры количества квантов в излучении абсолютно черного тела.

Для типовых параметров «смотрящего» тепловизора: фоточувствительной площадки $A = 30 \times 30$ мкм², телевизионного времени кадра $t_s = T_f = 40$ мс и относительного отверстия объектива 1:1 коэффициент собирания близок к 10^{-7} см²·с, так что согласно уравнениям (2) и (3) абсолютный минимум эквивалентной шуму разности температур при температуре объектов ~ 293 К составляет $NETD_{\min}^* \approx 1,8 \times 10^{-4}$ К. Таким образом тепловизоры являются весьма эффективными обнаружителями малых тепловых контрастов.

3. Спектральная зависимость эквивалентной шуму разности температур

Авторами исследована зависимость $NETD_r^*$ от длинноволновой границы чувствительности λ_m тепловизора с квантовыми фотоприемниками (см., например, кривую 2 на рис.1, вычисленную при $T=293$ К). Показано, что фундаментальный предел (уравнение (3)) достигается при $\lambda_m = 28$ ($293/T, K$) мкм. Однако этот минимум, связанный с флуктуациями потока фотонов с малыми энергиями, выражен слабо: при $\lambda_m \rightarrow \infty$ значение $NETD_r^*$ увеличивается относительно минимума всего на 14%. При λ_m , меньших длины волны, соответствующей максимуму излучения от абсолютно черного тела λ_{max} , наблюдается резкое возрастание с уменьшением λ_m .

В важном для практики диапазоне длин волн $\lambda_m \leq 1,5 \lambda_{max}$, в котором расположены основные окна прозрачности атмосферы, с достаточной для практических оценок точностью зависимость (λ_m) представляется в виде

$$NETD_r^*(\lambda_m) \approx \sqrt{2} \left(1 - \frac{kT \lambda_m}{hc} \right) kT^2 D_r^*(\lambda_m) \approx kT^2 D_r^*(\lambda_m). \quad (4)$$

Здесь c — скорость света, h — постоянная Планка.

Спектральная зависимость удельной обнаружительной способности для квантовых фотоприемников хорошо изучена. Предельные значения $NETD_r^*(\lambda_m)$ теперь могут быть найдены с помощью kT^2 -правила (соотношение (4)) простым умножением значения на коэффициент kT^2 , который, например, при температуре объектов наблюдения $T=293$ К равен $1,18 \times 10^{-18}$ Вт·К·с. Таким образом обеспечивается сравнительная оценка тепловизоров, работающих в различных спектральных диапазонах, по их температурной чувствительности. Соотношение (4) может быть переписано в следующем виде:

$$NETD_r^*(\lambda_m) \times NEP_r^*(\lambda_m) \approx kT^2 \quad (5)$$

где $NEP_r^*(\lambda_m)$ — радиационный предел удельной пороговой чувствительности.

Таким образом, kT^2 -правило: произведение эквивалентных радиационному шуму удельных разности температур и пороговой мощности не зависит от граничной длины волны и определяется только температурой объекта наблюдения.

4. Тепловые приемники излучения в тепловидении

В чувствительном элементе тепловых приемников излучения интегрируются фотопреобразование и накопление — два необходимых элемента оптимальной структуры канала матрицы с мультиплексором. При этом с использованием тепловой емкости легко обеспечиваются времена накопления, соответствующие телевизионной частоте кадров и не достигаемые в настоящее время с квантовыми фотоприемниками при $\lambda_m > 4...5$ мкм.

Авторами рассчитаны спектральные зависимости эквивалентной радиационному шуму разности температур $NETD_r^*$, а также обнаружительной способности D_r^* для тепловых приемников, чувствительность которых ограничена заданным спектральным диапазоном (кривые 3 и 4 на рис.1). Показано, что величины $NETD_r^*(\lambda_m)$ и $D_r^*(\lambda_m)$ связаны между собой соотношением, аналогичным (4):

$$NETD_r^*(\lambda_m) = \sqrt{2} kT^2 D_r^*(\lambda_m). \quad (6)$$

Однако в отличие от (4) kT^2 -правило для тепловых приемников является точным и справедливо для любого спектрального диапазона.

При $\lambda_m < \lambda_{max}$ кривые $NETD_r^*(\lambda_m)$ и $D_r^*(\lambda_m)$ для тепловых и квантовых приемников практически совпадают. Обусловлено это тем, что мощность излучения от абсолютно черного тела в основном сосредоточена в узком спектральном диапазоне вблизи λ_m .

Тепловой приемник, чувствительный в диапазоне $0... \lambda_m$, значительно уступает квантовому по обнаружительной способности только в дальнем инфракрасном диапазоне при $\lambda_m \gg \lambda_{max}$. Однако «паритет» между ними восстанавливается, если ввести ограничение по спектру слева $\lambda_v > \lambda_{max}$.

Авторами обнаружено, что в охлаждаемых тепловых приемниках с ограниченным с помощью оптического фильтра спектральным диапазоном требуемая

температура охлаждения с расширением спектрального диапазона не понижается, как у квантовых приемников, а повышается (рис. 2). Так при $\lambda_m \approx 3,5$ мкм для получения фоновго режима требуется охлаждение до азотных температур. Однако при распространенных в тепловидении значениях $\lambda_m = 10 \dots 14$ мкм температура охлаждения составляет 180...200 К и может быть обеспечена термоэлектрическими охладителями. Как известно, пороговые квантовые приемники на такой диапазон обычно требуют охлаждения до 77...90 К.

Теоретический предел — уравнение (6) — достигается только в том случае, когда шумы, обусловленные собственным тепловым излучением от чувствительного элемента, «выморожены» и преобладают флуктуации падающего потока. Однако требования по охлаждению тепловых приемников менее критичны, чем в случае квантовых. Так, если их спектральный диапазон определяется не оптическим фильтром, а поглощающими свойствами чувствительного элемента, то даже при комнатной температуре дисперсии шума падающего и излучаемого потоков фотонов оказываются равны друг другу, что приводит к ухудшению $D_r^*(\lambda_m)$ всего в $\sqrt{2}$ раз.

Выявленные закономерности обуславливают перспективность использования тепловых матричных приемников в тепловидении.

5. Чувствительность реальных тепловизоров

Авторами выполнен комплекс теоретических исследований с учетом реальных особенностей конструкции и условий работы тепловизора, в том числе:

- Разработаны методики расчета $NETD_r^*$ для тепловизоров, спектральный диапазон которых ограничен не только справа, но и со стороны коротких длин волн (см., например, кривую 4 на рис. 1). В частности показано, что тепловизоры, работающие в окне прозрачности атмосферы 8...14 мкм, отличаются от идеальных обнаружителей всего на 33 %.

- Разработаны методики расчета параметров обнаружения для тепловизоров с реальными фотоприемниками, обладающими низкочастотными шумами, и с предусилителями, обеспечивающими квазиоптимальную частотную фильтрацию фотосигналов.

- Значения $NETD$ для реальных тепловизоров и других оптико-электронных приборов получаются из соотношений (2), (4) и (6) после включения в величину η коэффициентов, характеризующих потери и шумы в канале преобразователя и в атмосфере. При этом kT^2 -правило — уравнение (4) — преобразуется к виду

$$NETD^*(\lambda_m) \approx kT^2 \frac{[D_r^*(\lambda_m)]^2}{D^*(\lambda_m)} \quad (7)$$

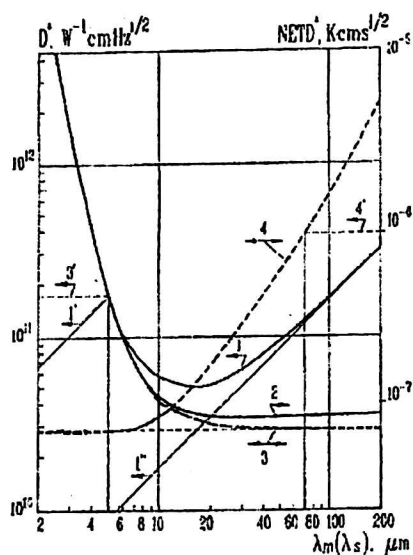
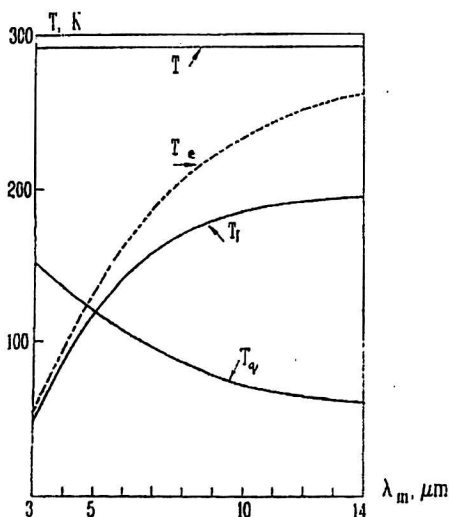


Рис. 1. Сравнение характеристик обнаружения для квантовых фотоприемников [кривые: 1 — $D^*(\lambda_m)$; 1' — $D^*(\lambda)$ при $\lambda_m = 5$ мкм; 1'' — $D^*(\lambda)$ при $\lambda_m \geq 70$ мкм; 2 — $NETD^*(\lambda_s)$] и тепловых приемников [кривые: 3 — $D^*(\lambda_m)$ и $NETD^*(\lambda_m)$; 3' — $D^*(\lambda)$ при $\lambda_m = 5$ мкм; 4 — $D^*(\lambda_s)$ и $NETD^*(\lambda_s)$; 4' — $D^*(\lambda)$ при $\lambda_s = 70$ мкм]. Масштаб по оси ординат для кривых $D^*(\lambda)$ указан слева, для $NETD^*(\lambda)$ — справа

Рис. 2. Зависимость температуры охлаждения оптического фильтра T_f и чувствительного элемента T_c от длинноволновой границы λ_m спектральной чувствительности теплового приемника

Окружающая температура $T = 293$ К;
 T_q — предельная рабочая температура квантовых фотоприемников с различными λ_m



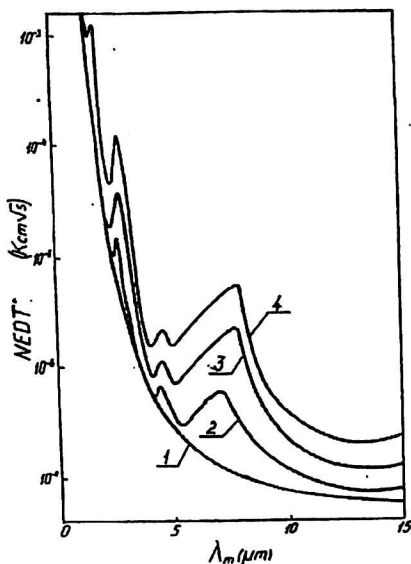
При стремлении $D^*(\lambda_m)$ к значению $D^*_{r}(\lambda_m)$ для идеального тепловизора соотношение (7) преобразуется обратно к уравнению (4). Согласно этому уравнению $NETD^*_{r}(\lambda_m) \sim D^*_{r}(\lambda_m)$. Поэтому в реальных тепловизорах с увеличением λ_m (до значения $\lambda_m \leq 1,5 \lambda_{max}$) и наблюдается одновременное уменьшение $NETD^*(\lambda_m)$ и $D^*(\lambda_m)$. Но если сравнивать реальные тепловизоры, чувствительные в одном и том же спектральном диапазоне, но с разными значениями D^* , то в соответствии с уравнением (7) имеет место стандартная связь этих параметров: $NETD^* \sim 1/D^*$, то есть с уменьшением D^* возрастает $NETD^*$.

• Рассчитано влияние поглощения в атмосфере в важных для практики случаях приземных горизонтальных трасс в условиях, приближающихся к термодинамическому равновесию (близкие температуры фона и атмосферы), или при

постоянном фоне (рис. 3). В этих случаях абсолютный минимум $NETD^*(\lambda_m)$ лежит в диапазоне 12...14 мкм. Кроме того, формируются побочные минимумы в окрестностях 2,5, 4,1 и 5,0 мкм. Ухудшение из-за поглощения в атмосфере значительно заметнее (в 2...2,5 раза) в диапазоне 3...5 мкм, чем в диапазоне 8...14 мкм.

Рис.3. Спектральная зависимость удельной величины эквивалентной фоновому шуму разности температур:

1 — без учета ослабления излучения атмосферой;
2,3,4 — с учетом ослабления на дальностях 300 м,
5 км 500 м и 16 км 200 м соответственно



- Теория распространена на различные оптико-электронные преобразователи: тепловые обнаружители с растровым сканированием, радиометры и др.

- Таблица иллюстрирует возможность использования выведенных авторами соотношений для расчета предельной разности температур фокальных матриц и оценки степени приближения реальных матриц по чувствительности к радиационному пределу.

Таблица

| Тип матрицы | QWIP | | CgHgTe | | | | | | PtSi-Шоттки барьер | |
|----------------------------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|--------------------|---------|
| | 256x256 | 640x512 | 128x128 | | 288x384 | 640x512 | 256x256 | | 256x256 | 486x640 |
| Спектральный диапазон, мкм | 8...10 | | 3...5 | 8...10 | 3...5 | | 3...5 | 8...10 | 3...5 | |
| Шаг, мкм | 40 | 24 | 40 | | 24 | | 40 | | 24 | |
| F/# | 2,0 | 2,0 | 1,5 | 1,8 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 1,5 | 2,0 |
| τ_i , мкс | 20 | 16 | 1,2 | 0,2 | 1,0 | 2,0 | 2,8 | 0,35 | 20 | 33 |
| NETD (300K), мК | 9,5 | 20 | 15 | 15 | 25 | 20 | 6,1 | 20 | 75 | 70 |
| NETD _r , мК | 8 | 15 | 9,2 | 6,7 | 24 | 12 | 6,3 | 6,0 | 38 | 42 |

Верхние строки таблицы взяты из статьи сотрудников германской фирмы АИМ, включающей данные по матрицам с различным форматом и шагом для спектральных диапазонов 3...5 и 8...10 мкм, изготовленных на основе различных полупроводниковых материалов: соединения CdHgTe, PtSi-Шоттки барьеров и квантовых ям (QWIP) на подложках из GaAs [10]. Статья [10] привлекла внимание авторов как разнообразием типов фокальных матриц, так и полнотой информации относительно условий их измерения.

В таблице $F/\#$ обозначает относительный входной диаметр объектива, τ_i — время накопления фотозаряда в пикселе, $NETD$ (300 К) — измеренные в [10] значения эквивалентной шуму разности температур.

В нижней строке таблицы приведены рассчитанные для указанных значений шага матрицы, относительного входного диаметра объектива и времени накопления предельные величины эквивалентной шуму разности температур. В соответствии с кривой 2 на рис. 1 значение $NETD^*$ для диапазона 3...5 мкм близко к $4 \cdot 10^{-7}$ К·см·с^{1/2}, а для диапазона 8...10 мкм — к 10^{-7} К·см·с^{1/2} (поглощением излучения в атмосфере и поправкой, обусловленной ограничением чувствительности матриц со стороны коротких длин волн, пренебрежено). Квантовый выход для фотодиодов из CdHgTe предполагался равным единице, а для QWIP и PtSi Шотки-барьерных структур 1%. Размеры фоточувствительной площадки принимались равными шагу матрицы.

Из таблицы следует, что все фокальные матрицы, описанные в [10], по эквивалентной шуму разности температур близки к радиационному пределу, а матрицы на основе CdHgTe форматом 288×384 и 256×256 для спектрального диапазона 3...5 мкм практически достигают этого предела.

В заключение раздела отметим только, что время накопления для различных матриц в таблице изменяется от 0,2 до 20 мс. Это означает, что предельная частота кадров например, для матриц из CdHgTe на спектральный диапазон 8...10 микрон на 2 порядка выше, чем для QWIP и PtSi Шотки-барьерных матриц. Таким образом, для оценки реальных чувствительности и информативности фокальных матриц и тепловизионных приборов необходимо, кроме значения NETD, учитывать кадровую частоту и возможности последующей обработки сигнала изображения.

6. Теория информации систем технического зрения

Признано, что основным параметром любой системы для преобразования изображения является ее информационная емкость, характеризующая возможности передачи этой системой максимального количества информации, содержащегося в воспринимаемом потоке излучения.

Авторами получено выражение для расчета предельной — ограниченной флуктуациями фона — удельной (отнесенной к единице площади фокальной матрицы и единичному времени накопления) скорости преобразования информации C^* в многоканальных оптико-электронных преобразователях:

$$C^* = \frac{1}{8AT_f} \log_2 \frac{\eta^{1/2} DR_r^*}{k_0} = \frac{1}{8AT_f} \log_2 \left[\frac{\text{Sin}(\beta/2)}{k_0} \sqrt{AT_f N} \right], \text{ байт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (8)$$

В выражении (8) k_0 — пороговое отношение сигнала к шуму, обеспечивающее заданную ошибку обнаружения (обычно $k_0 = 5$), DR_r^* — информационный потенциал оптического изображения или удельный динамический диапазон информационного канала, N — максимальная плотность излучения от объекта, выраженная в числе фотонов в спектральном диапазоне чувствительности системы технического зрения.

На основе данных о тепловом балансе Земли авторами рассчитаны информационные потенциалы зрения и тепловидения и выведено **правило информации**

онных потенциалов: в условиях теплового баланса Земли тепловидение по информационному потенциалу не уступает дневному зрению

$$DR_{IR}^* \geq DR_{vis}^* \approx 10^8, \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1/2}. \quad (9)$$

Этот на первый взгляд неожиданный результат обусловлен тем, что в обоих случаях потенциалы изображения определяются прежде всего мощностью солнечного излучения, падающего на Землю. При этом контраст в инфракрасном изображении объектов с разной излучательной способностью оказывается значительно ослабленным (до 6 раз — для вертикальных объектов в усредненных условиях теплового баланса) за счет противоизлучения атмосферы и окружающих предметов.

Однако согласно закону сохранения энергии плотность квантов длинноволнового излучения около поверхности Земли на порядок превышает их плотность в видимом диапазоне. Кроме того, в диапазоне 8...14 мкм коэффициент использования квантов оказывается почти в 3 раза больше, чем в видимой области.

Увеличение информационной емкости оптического изображения в результате преобразования поглощенного солнечного излучения в длинноволновый диапазон также представляется парадоксальным явлением: обычно любое преобразование сопровождается потерями. Однако в данном случае преобразованию подвергается средство передачи информации.

Правило информационных потенциалов имеет принципиальное значение. Согласно современным воззрениям «зрительный аппарат человека, оптимизированный в процессе миллионов лет на извлечение максимального объема информации из ограниченного количества света ..., представляет собой абсолютную и конечную веху эволюции» (А. Роуз, «Зрение человека и электронное зрение», 1977 г., Москва, «Мир»). Проведенные же оценки показывают, что по информационному потенциалу тепловидение по крайней мере не уступает дневному зрению. Преимуществами же наблюдения в инфракрасном диапазоне являются, как известно, независимость информационного потенциала от времени суток и меньшее рассеяние излучения в дымках, тумане и при искусственных помехах.

Неожиданными оказались также результаты сопоставления зрения и тепловидения при дистанционном наблюдении Луны: информационный потенциал даже освещенной части Луны в инфракрасном диапазоне оказывается в 20—25 раз больше, чем в видимом.

С помощью соотношения (8) было показано, что информационная емкость C системы технического зрения в основном определяется числом элементов разложения M в кадре и частотой кадров $f_f = 1/T_f$ и значительно слабее зависит от остальных параметров системы. При относительно высоких уровнях облученности, соответствующих дневному зрению и тепловидению, и типовых значениях параметров оптико-электронного преобразователя предельная скорость преобразования информации с помощью фокальной матрицы определяется соотношением

$$C = (1,8 \dots 2,0) M f_f, \text{ байт} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (10)$$

При ограниченной емкости накопительных элементов в реальных квантовых матрицах информационная емкость уменьшается примерно вдвое и определяется простейшим соотношением

$$C \approx Mf_f, \text{ байт} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (11)$$

Таким образом, в реальных электронно-оптических системах технического зрения каждый канал (пиксель) способен передать за время кадра один байт информации (**правило «слово на канал»**).

Согласно (11) для увеличения информационной емкости следует повышать M и, следовательно, уменьшать площадь фоточувствительного элемента вплоть до дифракционного предела. В этом предельном случае информационная скорость C достигает

$$C_{\max} = A_f f_f / \lambda^2 \pm 25\%, \text{ байт} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (12)$$

где A_f — площадь кадра в фокальной плоскости. В результате оптимальная оптическая система в тепловизоре имеет значительно больший объем (примерно в $(T_c/T_z)^3$, где $T_c = 5785 \text{ К}$, $T_z = 293 \text{ К}$ — температура Солнца и средняя температура Земли соответственно), чем в преобразователе видимого диапазона с такими же угловым полем зрения и разрешением. Вероятно, дифракционное ограничение и является причиной малой распространенности органа тепловидения у животных.

Показано, что по предельной информационной емкости дневное зрение близко к высокоуровневым системам технического зрения. Однако, информационные параметры существующих систем технического зрения пока далеки от теоретических пределов и, вероятно, будут существенно улучшены.

Авторами показано также, что при невысоких уровнях облученности имеет место важное для многоканальных оптико-электронных преобразователей видеоинформации **правило бинарных каналов**: *информационная емкость системы технического зрения максимальна при предельном пространственном разрешении — когда на один элемент разложения за время кадра падает количество квантов, необходимое для передачи одного бита информации.*

Площадь такого элемента разложения A_e оказывается обратно пропорциональной плотности потока фотонов N и времени кадра T_f

$$A_e = \frac{ek_0^2}{NT_f \text{Sin}^2(\beta/2)}. \quad (13)$$

Предельная величина удельной скорости преобразования информации, выраженная в битах на единицу площади фокальной матрицы и единицу времени, при обычных значениях k_0 и β тогда

$$C_{\max} = \frac{1}{(A_e T_f)_{\text{opt}}} \approx \frac{N}{600}, \text{ бит} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (14)$$

При этом предельная информационная емкость преобразователей изображения за время кадра выражается:

$$C_{\max} = \frac{A_f}{A_e}, \text{ бит/кадр}, \quad (15)$$

и в соответствии с уравнениями (13) и (15) величина C_{\max} пропорциональна плотности падающих квантов.

По-видимому, объединение в сетчатке глаза палочек в группы и обеспечивает необходимое увеличение размеров фотоприемных площадок при низких освещенностях.

Таким образом, сколько раз уложится на площади кадра элемент разложения A_c , таким и будет при заданной низкой освещенности предельное значение информационной емкости, выраженное в битах — уравнение (15). Сколько раз уложится на площади кадра элемент λ^2 , таким и будет при высокой облученности предельное значение информационной емкости, но выраженное уже в байтах — соотношение (12).

Предельная информационная емкость многоцветных систем технического зрения увеличивается пропорционально числу независимых спектральных каналов (например, с разнесенными спектральными диапазонами) в каждом элементе (пикселе).

7. Заключение

Предельные параметры тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения представлены в канонической форме через соответствующие потенциалы оптического изображения и обобщенную эффективность приемного тракта оптико-электронного преобразователя.

Рассчитаны спектральные зависимости эквивалентной радиационному шуму удельной разности температур $NETD^*_r$ для тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения с квантовыми и тепловыми приемниками а также обнаружительной способности D^*_r для тепловых приемников, чувствительность которых ограничена заданным спектральным диапазоном.

Показано, что спектральные зависимости предельно достижимых параметров $NETD^*_r$ и D^*_r связаны между собой с помощью kT^2 -правила, причем для тепловых приемников это правило является точным и справедливо для любого спектрального диапазона.

Минимальная разность температур, обнаруживаемая по тепловому излучению объектов, увеличивается при понижении их температуры (**тепловизионный парадокс**), при этом информационная емкость тепловизоров уменьшается.

Рабочая температура тепловых приемников излучения при охлаждении чувствительного элемента путем радиационного обмена через оптический фильтр повышается при сдвиге спектрального диапазона чувствительности в длинноволновую область (в отличие от квантовых фотоприемников), что обуславливает перспективность использования тепловых приемников в «смотрящих» тепловизорах.

Обнаружено, что по информационному (динамическому) потенциалу изображения и соответственно по предельной информационной емкости тепловидение в условиях теплового баланса Земли не уступает дневному человеческому зрению (**правило информационных потенциалов**) даже с учетом уменьшения контраста в тепловом изображении в результате противоизлучения окружающих объектов. Этот результат является принципиальным, так как согласно современному пониманию «зрительный аппарат человека ... представляет собой абсолютную и конечную веху в эволюционном развитии» и обеспечивает людям 80—90 % общего объема воспринимаемой информации.

Рассчитаны предельные значения удельной информационной емкости оптико-электронных преобразователей изображения при относительно высоких уровнях облучения, в том числе с учетом дифракционного ограничения размеров фоточувствительных площадок (**правило «слово на канал»**).

Предельная информационная емкость многоцветных систем технического зрения пропорциональна числу независимых спектральных каналов в каждом элементе пространственного разложения.

Обнаружено, что при относительно невысоких облученностях информационная емкость преобразователей изображения максимальна при предельном пространственном разрешении — когда на один элемент разложения за время кадра попадает количество квантов, необходимое для передачи одного бита информации (**правило бинарных каналов**).

Показано наконец, что повышение чувствительности и информационной емкости тепловизоров в результате использования «смотрящих» матриц, фрагментной и межкадровой обработки сигнала изображения, а также введения условных спектральных цветов позволит в усредненных условиях теплового баланса Земли осуществить качественный переход: от видения источников тепла к видению в тепловых лучах с максимальной информативностью.

Все перечисленные результаты получены впервые и ранее в мировой научно-технической литературе опубликованы не были.

Таким образом, авторами разработана теория предельной чувствительности и информационной емкости тепловизоров и других оптико-электронных систем технического зрения, определяющая перспективы и способствующая дальнейшему развитию практического тепловидения.

Многочисленные и разнообразные применения тепловидения, по информативности не уступающего зрению, но являющемуся круглосуточным и помехозащищенным; разработка и промышленное освоение необходимых оптических, фотозлектронных и микрокриогенных компонентов; пригодность для преобразования и представления тепловизионной информации существующих телевизионных методов и аппаратуры — все это позволяет сделать вывод, что в ближайшие годы тепловидение получит бурное развитие как одна из ведущих информационных технологий XXI века. Разрабатывается и готовится к выпуску чрезвычайно широкая номенклатура тепловизоров — от уникальных сверхчувствительных и высокоинформативных систем до таких изделий массового спроса, как бытовые тепловизионные приставки к телевизорам и персональным электронно-вычислительным машинам и малогабаритные приборы для круглосуточного видения.

В связи с изложенным авторы выражают надежду, что результаты их исследований окажутся актуальными и полезными.

8. Благодарности

Исследования, опубликованные в [2], были выполнены авторами в сотрудничестве с Н. В. Васильченко. Мы скорбим об уходе из жизни этого замечательного человека и специалиста.

Авторы выражают глубокую благодарность Генеральному директору Государственного научного центра РФ «НПО «Орион» профессору А. М. Филачеву

за предоставленные возможности для исследовательской работы, члену-корреспонденту Российской академии наук Л. Н. Курбатову, члену-корреспонденту Российской академии наук М. М. Мирошникову, профессору W. L. Wolfe (Optical Science Center, University of Arizona, USA) и профессору В. В. Осипову за полезные дискуссии, а также кандидату технических наук Л. А. Гончарову за помощь в оформлении.

Литература

1. Таубкин И. И., Трищенко М. А. Минимальная пороговая разность температур, обнаруживаемая тепловизионным методом // Оптический журнал, 1993. № 5. С. 20—23.
2. Taubkin I. I., Trishenkov M. A., Vasilchenko N. V. Minimum temperature difference detected by the thermal radiation of objects // Infrared Phys. Technol., 1994. Vol. 35, № 5. P. 715—732.
3. Taubkin I. I., Trishenkov M. A. Theoretical limited temperature sensitivity of thermal detectors with restricted spectral range // Proc. SPIE, 1994. Vol. 2225. P. 97—108
4. Таубкин И. И., Трищенко М. А. Сравнительная оценка информационной емкости зрения и тепловидения в условиях теплового баланса Земли. I. Зрение // Оптический журнал, 1995. № 4. С. 11—18.
5. Таубкин И. И., Трищенко М. А. Сравнительная оценка информационной емкости зрения и тепловидения в условиях теплового баланса Земли. II. Тепловидение // Оптический журнал, 1995. № 5. С. 41—49.
6. Taubkin I. I., Trishenkov M. A. Information capacitance of the electronic vision systems // Infrared Phys. Technol., 1996. Vol. 37. P. 675—693.
7. Таубкин И. И., Трищенко М. А. Предельные чувствительность и информативность тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения // Оптический журнал, 1996. № 6. С. 18—41.
8. Taubkin I. I., Trishenkov M. A. Ultimate sensitivity and information capacity of thermal imagers and after electronic-vision systems // Proc. SPIE, 1997. Vol. 3200. P. 157—162.
9. Trishenkov M. A., Taubkin I. I. Investigation of ultimate information characteristics of electronic-vision systems // Proc. SPIE, 1999. Vol. 3898. P. 350—356.
10. Breiter R. et al. High resolution QWIP and MCT FPA modules at AIM // Proc. SPIE, 1999. Vol. 3698. P. 397—406.

Limiting values of the IR-imagers responsivity and the technical vision systems selfdescriptiveness

I. I. Taubkin, M. A. Trishenkov
The ORION R&P Association, Moscow, Russia

Main results of theoretical studies of maximum (limited by background fluctuations) temperature sensitivity of thermal imagers and information capacity of electronic-vision systems are given.

Spectral dependences of noise equivalent temperature difference for thermal imagers with quantum and thermal detectors are calculated. It is shown that by this parameter thermal imagers using the best array photodetective assemblies approach the theoretical limit.

It is found that by the information (dynamic) potential and the maximum information capacity thermal imaging in conditions of the Earth heat balance does not yield to the day-time human vision.

Maximum values of a specific information capacity of electronic-vision systems at high levels of radiation are limited by diffraction (rule "word per channel"). At low levels of radiation maximum information capacity is achieved when a number of quanta necessary for transformation of one information bit (rule of "binary channels") fall on a spatial resolution element during the frame time. Maximum information capacity of coloured electronic vision systems is proportional to the number of independent spectral channels.